

试验方法对复合绝缘子污秽闪络特性的影响

蒋兴良, 肖代波, 胡建林, 张志劲, 张鑫

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: IEC 及中国相关标准推荐了几种绝缘子污秽的试验方法, 但不同试验方法对复合绝缘子污闪特性的影响并不明确。以复合绝缘子为例, 分别采用恒压升降法、均匀升压法、最大耐受法试验研究了复合绝缘子的交流污秽闪络特性。结果表明: 试验方法对污秽影响特征指数 α 值的影响不明显; 在标准偏差取 7.0% 时, 采用均匀升压法得到的 50% 闪络电压比采用恒压升降法得到的 50% 耐受电压高 0.5 个标准偏差, 采用最大耐受法得到的最大耐受电压 U_{mw} 等于采用恒压升降法得到的闪络概率为 10% 的污闪电压; 不同的试验方法得到的试验结果存在内在联系, 可以根据试验的具体情况, 选择适当试验方法。

关键词: 复合绝缘子; 闪络特性; 试验方法

中图分类号: TM216

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2010)02-0008-04

Influence of Test Methods on Pollution Flashover Performance of Composite Insulators

JIANG Xing-liang, XIAO Dai-bo, HU Jian-lin, ZHANG Zhi-jin, ZHANG Xin

(The State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Different methods for testing pollution flashover performance are recommended in IEC and Chinese standards, but the differences among the test methods are not pointed out. In this paper, the pollution flashover performance of composite insulator is tested with uniform increase voltage method, 50% withstand voltage method, and maximum withstand voltage method, respectively. The results indicate that the influences of different test methods on the index value α are not obvious. For the standard deviation of 7.0%, the 50% flashover voltage from uniform increase voltage method is 0.5 standard deviation higher than that from the 50% withstand voltage method, the maximum withstand voltage U_{mw} is equal to the flashover voltage from the uniform increase voltage method with a flashover probability 10%. It is concluded that there exist internal relations among the results from different test methods, so appropriate test method may be chosen according to specific situation of test.

Key words: composite insulator; flashover performance; test method

0 引言

为了避免和减少污秽闪络事故给电力系统带来的危害, 必须通过合理的人工污秽实验, 模拟自然界污秽的实际状况对其污闪特性进行验证。人工污秽试验方法中如何正确表征试验绝缘子承受的电压形式, 以保证与污秽绝缘子实际运行情况吻合是十分重要的。

国内外对各种型式绝缘子的交流污秽闪络特性开展了大量研究^[1-3], 但这些研究都是建立在某一种试验方法上的。文[4]认为, 采用恒压升降法求取绝

缘子串试品在给定污秽度下的 50% 耐受电压及标准偏差, 与升压法相比, 更接近绝缘子在实际运行中的工况。文[5]和文[6]表明, 升压法得到的 U_f 与耐受法得到的 50% 耐受电压之间相差一个标准偏差 σ , 具有一定的分散性。文[7]提出, 求取 50% 耐受电压法 ($U_{50\%}$) 的试验方法建议首选恒压升降法, 如果试验工作量太大, 也允许采用升压法, 用升压法获得的 U_f 可以近似代表 $U_{50\%}$ 。文[8]研究认为, 雾中耐受电压 U_w 和由升压法得到的 50% 闪络电压的关系为: $U_w = U_{50\%} - 2\delta$, 分析耐受电压比值 $C = U_w / U_{50\%}$ 发现, 每种绝缘子的耐受电压比值 C 与盐密无关, 每种绝缘子的 C 值各不相同。

收稿日期: 2009-02-13; 修回日期: 2009-10-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (973 项目: 2009CB724503); 输配电装备与系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目 (2007DA10512708102)。

作者简介: 蒋兴良 (1961—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 现从事高电压与绝缘技术、输电线路覆冰及防护研究工作。

IEC 60507—1991、GB/T 4585—2004 等标准推荐了几种不同人工污秽试验方法,但对于不同加压方法下绝缘子闪络特性是否存在差异,到目前为止国内外并没有对此进行深入开展和比较研究。笔者通过人工污秽试验,研究了复合绝缘子在恒压升降法、均匀升压法、最大耐受法下交流污秽闪络特性,分析 3 种试验方法对复合绝缘子人工污秽闪络特性的影响及内在关系,研究结果对于完善绝缘子人工污秽试验方法具有重要的现实意义和参考价值。

1 试验装置及试验方法

1.1 试验装置及试验电源

污秽试验是在 $4\text{ m}\times 4\text{ m}\times 3\text{ m}$ 的人工雾室中进行的,由 $150\text{ kV}/900\text{ kV}\cdot\text{A}$ 试验变压器提供试验电压,其短路阻抗为 8.25% ,配套 10 kV 调压器的短路阻抗为 8.34% ,试验变压器输出电压 150 kV (峰值)时的最大短路电流为 30 A ,满足 IEC 标准对污秽试验电源的要求。试验原理接线图见图 1。

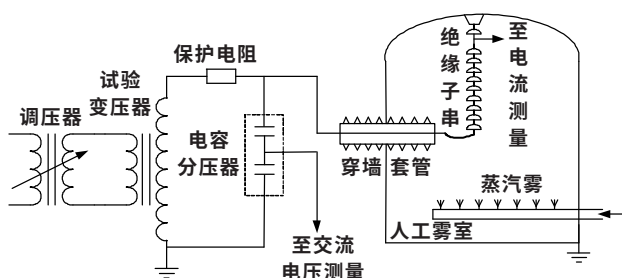


图 1 污秽试验原理接线

1.2 试品

试品为两种不同伞形结构复合绝缘子 FXBW-35/70 (试品 A 和 B),并且在试验前未曾使用过,基本技术参数和结构图见表 1 和图 2。

1.3 试验方法

参照相关试验标准^[9-12],试验方法如下。

1.3.1 试品预处理

试验前用自来水清洗,除去表面污秽物,并让其自然阴干待试。染污前用干燥棉团在复合绝缘子表面均匀涂敷一层干燥硅藻土,再用洗耳球吹掉表面多余硅藻土,使绝缘子表面附着一层很薄的亲水性物质,破坏表面的憎水性,使其憎水性处于 HC4~HC5 级(因硅藻土极薄,可忽略对灰密的影响)。

1.3.2 试品染污

试验采用固体涂层法染污(定量涂刷方法)。用 NaCl 模拟导电物质,用硅藻土模拟不溶物质。根据试品表面积和所试验的盐密/灰密,计算并称量出所需 NaCl 和硅藻土的量,放入洁净瓷碗中并加入

表 1 试品绝缘子的参数

试品	H/mm	L/mm	h/mm	d/mm	D/mm
A	650	1 100	460	22	126/95
B	559	998	426	16	100

注: H —结构高度; L —爬电距离; h —电弧距离; d —杆径; D —盘径。

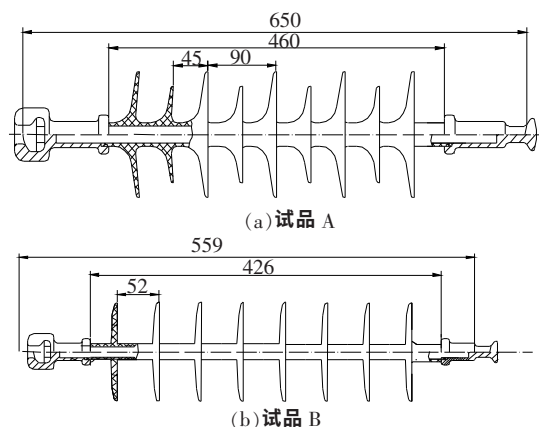


图 2 试品绝缘子结构图

适量电导率 $<10\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ 的去离子水,充分搅拌成糊状,再用小排刷将全部污秽物均匀涂刷于绝缘子试品表面,涂刷过程在 1 h 内完成,然后让其自然阴干 $22\sim 26\text{ h}$ 后进行试验,使其憎水性得到一定恢复和迁移。

1.3.3 试品湿润

将试品垂直悬挂于人工气候室顶部,试品受潮采用蒸汽雾,蒸汽由贴近地表面的蒸汽管道输送,蒸汽雾输入速率为 $(0.05\pm 0.01)\text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^3)$,雾室湿度近乎达到饱和湿润状态。湿润开始前试品与环境的温差小于 2 K ,湿润开始试验过程中,雾室温度控制在 35°C 以下,当温度高于 35°C 时,停止试验,采用排风和喷洒水雾等手段给雾室降温至室外温度再重新试验。试品湿润时间为 $15\sim 20\text{ min}$,绝缘子表面污层充分湿润时开始加压立即进行试验。

1.3.4 试验方法

污秽复合绝缘子的污闪特性采用 IEC 60507—1991 推荐的恒压升降法、均匀升压法和最大耐受法。

(1)恒压升降法:按 IEC 60507—1991 推荐的程序 B 进行,即通入蒸汽的同时,对试品施加电压。在整个试验期间,输入连续、稳定的蒸汽至雾室,绝缘子每涂污一次只进行一次试验,单串试验结束后,排掉雾室中的蒸汽雾,待雾室温度与外界温度一致后,再进行下一单串的试验;每一次试验时,施加电压水平应按升降法来改变,电压级差约为预期电压的 10% 。即前一次没有通过耐受,则降低 10% 的电压再做耐受试验,若通过耐受,则升高约 10% 电压再作耐受试验,反复试验直到有效试验次数在 10 次以

上; 试品耐受过程中出现峰值电流并且泄漏电流逐渐减少到峰值电流的 10% 左右, 或电流明显减小, 放电趋势明显减弱, 在耐压 45~60 min 后, 则认为试品不存在闪络可能, 在耐受过程中, 试品闪络则进行下一级电压的试验。其值按式(1)计算。

$$U_{50(1)} = \frac{\sum (n_i U_i)}{N} \quad (1)$$

式(1)中, $U_{50(1)}$ 为恒压升降法得到的 50% 耐受电压, kV; U_i 为某一施加电压值, kV; n_i 为施加电压 U_i 的次数; N 为有效试验总次数。

(2) 均匀升压法: 试验是在染污绝缘子达到饱和湿润时施加电压, 以一定的速率升高电压直至闪络。对每只绝缘子进行 4~5 次闪络试验, 每次间隔 1~2 min; 在同一个污秽度下, 选择 5 串绝缘子进行重复试验, 取其中与平均值误差不超过 10% 的所有闪络电压的平均值为该污秽度下绝缘子的 50% 闪络电压 ($U_{50(2)}$)。

(3) 最大耐受法: 将试品准备妥当后用蒸气雾使试品均匀受潮, 试品周围温度不超过 40℃。当污层电导率达到最大值时, 快速 (不超过 5 s) 升压到预计的试验电压值并维持恒定, 若不闪络, 则维持 15 min, 耐受通过后将绝缘子从雾室取出。可将已试的试品第二次放入雾室, 重复试验, 要求试品受潮后测得的电导率不低于前一次的 90%。试验从较高试验电压开始, 试品闪络后再降低 5% 试验电压作耐受试验, 直到总耐受次数达到 3 次, 则此次耐受电压为最大耐受电压 (U_{nw})。最大耐受电压法试验流程见表 2。

表 2 最大耐受电压法试验流程

耐受电压	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次
U_1	闪络	闪络	/	/
$U_2=0.95U_1$	耐受	闪络	耐受	耐受
$U_3=0.95U_2$	耐受	耐受	耐受	/

注: $U_2=U_{nw}$, 为最大耐受电压。

2 试验结果及分析

2.1 试验结果

试验时盐密与灰密之比为 1:6, 盐密 (SDD) 分别为 0.05、0.10、0.15、0.20 mg/cm²。试验结果见表 3, 试验结果的标准偏差均小于 7%。

2.2 污闪电压与盐密的关系

由表 3 可得试品在不同加压方法下的污闪电压 U_f 与 SDD 的关系, 见图 3。

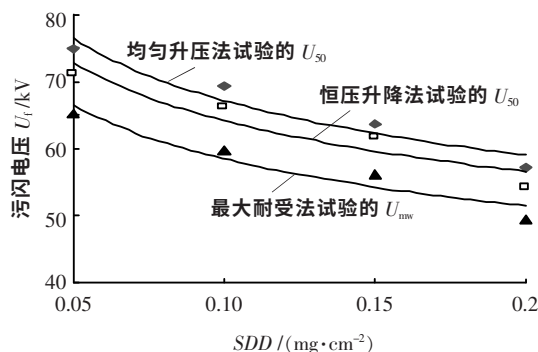
研究结果表明^[1]: 绝缘子污闪电压 U_f 与 SDD 的关系为

表 3 试品的闪络电压试验结果

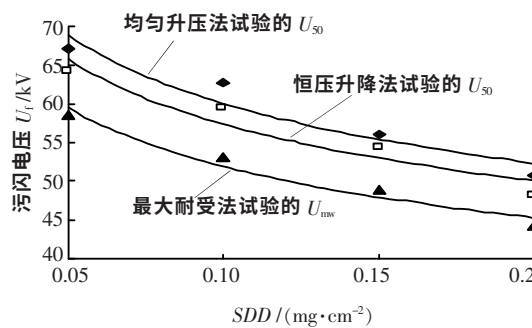
盐密/ (mg·cm ⁻²)		$U_{50(1)}$ /kV	$U_{50(2)}$ /kV	U_{nw} /kV	U_1 /kV	Δ_1 /%	U_2 /kV	Δ_2 /%		
试品 A	0.05	U_t	71.1	74.8	65.3	64.7	0.90	72.2	-1.50	
		$\sigma\%$	6.28	3.88	2.53	/	/	/	/	
	0.10	U_t	66.3	69.4	59.7	60.4	-1.08	67.0	-1.00	
		$\sigma\%$	5.55	3.25	2.63	/	/	/	/	
	0.15	U_t	61.7	63.6	56.2	56.2	0.07	61.4	0.53	
		$\sigma\%$	4.85	2.98	2.39	/	/	/	/	
	0.20	U_t	54.2	57.1	49.5	49.3	0.33	55.1	-1.64	
		$\sigma\%$	5.05	2.26	3.16	/	/	/	/	
	试品 B	0.05	U_t	64.2	67.2	58.6	58.4	0.28	64.8	-1.00
			$\sigma\%$	5.13	3.65	2.40	/	/	/	/
		0.10	U_t	59.5	62.7	53.1	54.2	-1.96	60.5	-1.66
			$\sigma\%$	4.74	3.24	2.15	/	/	/	/
0.15		U_t	54.3	56.0	48.8	49.4	-1.27	54.0	0.48	
		$\sigma\%$	4.38	2.58	1.84	/	/	/	/	
0.20		U_t	48.2	50.8	44.2	43.9	0.74	49.0	-1.68	
		$\sigma\%$	4.25	2.23	2.64	/	/	/	/	

注: $U_1=U_{50(1)} \times (1-1.282 \times 7\%)$; $U_2=U_{50(2)} \times (1-0.5 \times 7\%)$;

$\Delta_1(\%)=100\% \times (U_{nw}-U_1)/U_1$; $\Delta_2(\%)=100\% \times (U_{50(1)}-U_2)/U_{20}$



(a) 复合绝缘子 A



(b) 复合绝缘子 B

图 3 不同加压方法下污闪电压与盐密关系

$$U_f = A \times (SDD)^{-a} \quad (2)$$

式(2)中, A 是由绝缘子材质和结构决定的常数; a 为污秽对 U_f 影响的特征指数, 随着电压类型、绝缘子形式、海拔高度不同而变化, 其值越大, U_f 随 SDD 增加而下降的趋势越明显。将表 3 试验结果按式(2)进

行拟合可得其系数 A 、特征指数 a 以及试验结果与拟合曲线的相关系数 R , 见表 4。

表 4 不同加压方法下各试品的 A 、 a 值

试品	加压方法	A	a	R^2
A	均匀升压法	43.77	0.186	0.924
	恒压升降法	42.27	0.182	0.885
	最大耐受法	38.20	0.185	0.914
B	均匀升压法	37.11	0.197	0.924
	恒压升降法	36.50	0.196	0.914
	最大耐受法	33.06	0.196	0.962

由图 3 和表 4 可知: 不同试验方法得到的闪络电压 U_f 均随 SDD 的增大而降低, 且 3 种试验方法得到的污闪电压值有明显的差异, 其中均匀升压法得到的闪络电压最高, 恒压升降法次之, 最大耐受法最低; 试验方法对污秽影响特征指数 a 值的影响不明显, 可以认为 a 值变化与试验方法无关, 但伞形结构对 a 有明显影响, 如伞倾角为 13° 左右的试品, A 的 a 值为 $0.18 \sim 0.19$, 而伞倾角近似为 0° 的试品, B 的 a 值为 $0.19 \sim 0.20$ 。

2.3 试验方法对试验结果的影响

污秽绝缘子的闪络电压分布规律服从正态分布, 即闪络电压 $U_f \sim N(\mu, \sigma^2)$, μ 为 $U_{50\%}$; σ 为标准偏差。对于放电概率为 $\alpha\%$ 的电压, 可得 $U_{\alpha\%}$ 为

$$U_{\alpha\%} = U_{50\%}(1 + K_{\alpha\%}\sigma\%) \quad (3)$$

式(3)中, $K_{\alpha\%}$ 是标准正态分布中的样本, 因为 $\alpha\% < 50\%$, $U_{\alpha\%} < U_{50\%}$, 故 $K_{\alpha\%}$ 取负值。IEC/IC 28 推荐的统一平均标准偏差 10% , 查标准正态分布得 $K_{10\%} = -1.282$, 则

$$U_{10\%} = U_{50\%}(1 + K_{10\%}\delta\%) = U_{50\%}(1 - 1.282\delta\%) \quad (4)$$

试验结果表明, 3 种试验方法分别得到的污闪电压在数值上有较大差异, 分析表 3 试验结果可知, 当试验结果的标准偏差取 7.0% 时, 3 种试验方法得到的 50% 闪络电压和最大耐受电压之间满足以下关系

$$U_{50(1)} \approx U_2 = U_{50(2)} \times (1 - 0.5 \times 7\%) \quad (5)$$

$$U_{mw} \approx U_1 = U_{50(1)} \times (1 - 1.282 \times 7\%) \quad (6)$$

且 U_{mw} 与 U_1 、 U_2 与 $U_{50(1)}$ 之间的误差小于 $\pm 2.0\%$ 。由以上分析可知:

(1) 由式(5)可以看出, 采用均匀升压法得到的 50% 闪络电压比采用恒压升降法得到的 50% 耐受电压高 0.5 个标准偏差。

(2) 比较式(4)和式(6)可知, 采用最大耐受法得到的最大耐受电压 U_{mw} 等于采用恒压升降法得到的闪络概率为 10% 的污闪电压。

(3) 由式(6)可知, 当用最大耐受法得到最大耐受电压 U_{mw} , 可以求得恒压升降法的 50% 耐受电压 (取标准偏差为 7%) $U_{50(1)}$ 为

$$U_{50(1)} = \frac{U_{mw}}{1 - 1.282\delta\%} \approx 1.10U_{mw} \quad (7)$$

由此可知, 采用不同试验方法对污秽复合绝缘子进行闪络试验均可得到其污闪特性, 不同试验方法的试验结果存在内在联系。因此, 可以根据试验的具体情况, 选择适合的试验方法。

3 结论

(1) 尽管试验方法不同, 但是不同的试验方法对污秽影响特征指数 a 值的影响并不明显, 即 a 值变化与试验方法无关。

(2) 当试验结果的标准偏差取 7.0% 时, 采用均匀升压法得到的 50% 闪络电压比采用恒压升降法得到的 50% 耐受电压高 0.5 个标准偏差, 最大耐受法试验得到的最大耐受电压 U_{mw} 等于恒压升降法得到的闪络概率为 10% 的污闪电压。

(3) 不同试验方法得到的试验结果存在明显的差异, 但存在内在联系, 可以根据试验的具体情况, 选择恰当的试验方法。

参考文献:

- [1] 蒋兴良, 舒立春, 孙才新. 电力系统污秽与覆冰绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 舒立春, 冉后鹏, 蒋兴良. 瓷和玻璃绝缘子人工污秽交流闪络特性及有效爬电系数的比较[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 6-10.
- [3] 张志劲, 蒋兴良, 孙才新. 污秽绝缘子闪络特性研究现状及展望[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 36-40.
- [4] 马 仪, 姜虹云. 求取绝缘子串 50% 耐受电压的直流人工污秽试验[J]. 云南电力技术, 2003, 31(2): 35-37.
- [5] 李立涅, 蒋兴良, 孙才新, 等. ± 800 kV 直流复合绝缘子短样人工污秽闪络特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 14-19.
- [6] 蒋兴良, 张志劲, 胡建林, 等. 高海拔下不同伞形结构 750 kV 复合绝缘子短样交流污秽闪络特性及其比较[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 159-164.
- [7] 关志成, 刘瑛岩, 周远翔, 等. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [8] 宿志一, 刘燕生. 线路污秽绝缘子的直流雾中耐受电压特性[J]. 高电压技术, 1986(3): 20-24.
- [9] IEC 60507—1991 Artificial Pollution Tests on High-voltage Insulators to be Used on AC Systems[S].
- [10] DL/T 859—2004 高压交流系统用复合绝缘子人工污秽试验[S]. 2004.
- [11] IEC 61245—1993 Artificial Pollution Tests on High-voltage Insulators to be Used on d.c. System[S]. 1993.
- [12] GB/T 4585—2004 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验[S].